

УДК 669:373.167.1

Е. В. Торопов¹, Л. Е. Лымбина¹, Ю. Г. Ярошенко²

¹ ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия;

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АДАПТАЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 1000...2000 К

Аннотация

Точность расчетов теплообмена излучением от потока высокотемпературного газа, полученного при сжигании природных топлив, в значительной степени зависит от точности и представительности данных о теплофизических свойствах газов и величине радиационного теплового потока. Основную физическую нагрузку несет плотность собственного теплового потока, но все экспериментальные данные по излучению газовых смесей представлены в виде интегральной степени черноты компонентов и смеси в целом. Поэтому в работе определяется степень черноты углекислоты и водяного пара как основных составляющих продуктов сгорания промышленного топлива. На основе надежных экспериментальных данных разработаны зависимости, позволяющие производить расчеты степени черноты продуктов сгорания. Определена точность расчетного приближения экспериментальных данных в поле двух факторов – оптической плотности газа и его температуры. Результаты работы рекомендуется применять при разработке программ расчета теплообмена.

Ключевые слова: *степень черноты, поток излучения, температура, углекислота, водяной пар.*

Abstract

The accuracy of calculating heat exchange by radiation from high-temperature gas flow produced during natural fuels combustion to a large extent depends on the accuracy and status of data on thermophysical properties of gases and the value of the radiative heat flux. The main physical load is carried by the density of the intrinsic heat flux, but all the experimental data on gas mixtures radiation are given as a total emissivity of the components and the mixture in general. That is why this study determines the emissivity factor of carbon dioxide and water vapour as the main constituents of the products of industrial fuel combustion. Dependencies are developed based on reliable experimental data and allow to perform emissivity factor calculations for the products of combustion. The accuracy of calculated approximation is determined for experimental data in the field of two factors: optical density of gas, and its temperature. The study results are recommended to be used for developing heat exchange calculation programs.

Key words: *emissivity factor, radiation flux, temperature, carbon dioxide, water vapour.*

Введение. При разработке математических моделей сложных теплоэнергетических и теплотехнических систем, работающих при температурах 1000...2000 К, необходима адаптация разрозненных экспериментальных данных по излучению компонентов, входящих в различных пропорциях в состав продуктов сгорания. Аналогичные задачи встают при проектировании высокотемпературных агрегатов, при их испытании и моделировании с переходом на новый

технологический и производственный уровень [1, 2]. Этими соображениями определяется актуальность поставленной задачи.

1. *Постановка задачи, исходные данные, метод адаптации.* Экспериментальные данные по плотности потока собственного излучения трехатомных компонентов продуктов сгорания различных топлив (ПС) E_{RO_2} и $E_{\text{H}_2\text{O}}$, Вт/м², в обработке проф. Телегина А.С. представлены в табличном виде для температуры продуктов сгорания (ПС) 800...1600 °С и оптической плотности среды от 0,04 до 1,5 в размерности $0,01 [\text{RO}_2^{6,7}]s_{\text{эф}}$ и $0,01[\text{H}_2\text{O}^{6,7}]s_{\text{эф}}$, где в квадратных скобках – процентное содержание соответствующих газов во влажных ПС [3]. С фиксацией атмосферного давления в топке 0,1 МПа и с переходом от процентов к объемной доле компонентов ПС можно ввести оптическую плотность в виде $l_p = 0,1r_{\text{RO}_2} \cdot s_{\text{эф}}$ и $l_p = 0,1r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot s_{\text{эф}}$, причем фактическая оптическая плотность изменяется в пределах $l_p = 0,004...0,15$ МПа·м. Температурный фактор также преобразуется в $\theta = (t+273)/100$. При формализации как табулированных [3], так и графических [4] данных нами применялся метод последовательного определения интерполяционных коэффициентов многочленов второго порядка Грегори – Ньютона.

2. *Степень черноты углекислоты и водяного пара.* В координатном пространстве $\varepsilon_{\text{CO}_2} = f(l_p, \theta)$ зависимость для степени черноты углекислоты, адаптированную к графическим зависимостям Х. Хоттеля [1, 4], можно представить в виде произведения трех функционалов

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = F_1(l_p, \theta) \cdot F_2(l_p, \theta) \cdot F_3(l_p, \theta), \quad (1)$$

где

$$F_1(l_p, \theta) = f_1(\theta) + F_4(l_p, \theta) + F_5(l_p, \theta), \quad (2)$$

$$f_1(\theta) = 23,01624824 - 2,06153174 \theta + 0,048771548 \theta^2, \quad (3)$$

$$F_4(l_p, \theta) = l_p (-598,3855576 + 58,35333722\theta - 1,472306287\theta^2), \quad (4)$$

$$F_5(l_p, \theta) = l_p^2 (3031,557034 - 299,1083856\theta + 7,62252034\theta^2), \quad (5)$$

$$F_2(l_p, \theta) = l^{m_1}, \text{ где } m_1 = 0,97 - 0,01875 \theta, \quad (6)$$

$$F_3(l_p, \theta) = \theta^{-n_1}, \text{ где } n_1 = 0,004775 + 0,01892 l_p. \quad (7)$$

Расчет степени черноты CO_2 в рамках примера для $l_p = 0,04$ и $\theta = 13,73$ ($t = 1100$ °С) дает отклонение от данных Х. Хоттеля $\Delta = -0,12$ % и $E_{\text{CO}_2} = \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot 5,67\theta^4 = 3 \cdot 10^4$ Вт/м² при $\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,149$. Определенная незначительная погрешность, характерная и для других интервалов, обеспечивает достоверность представления данных Х. Хоттеля в виде зависимостей (1)–(7).

Аналогичные зависимостям (1)–(7) для степени черноты водяных паров $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ получены расчетные формулы

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = F_1(l_p, \theta) \cdot F_2(l_p, \theta) \cdot F_3(l_p, \theta), \quad (8)$$

где

$$F_1(l_p, \theta) = F_4(l_p, \theta) \cdot F_5(l_p, \theta), \quad (9)$$

$$F_4(l_p, \theta) = \theta^{n_2}, \quad (10)$$

$$F_5(l_p, \theta) = l_p^{m_2}. \quad (11)$$

В выражениях (8)–(11) введены обозначения

$$\begin{aligned} n_2 = & 0,210867479 - 0,01843152 \theta + 0,438195 \cdot 10^{-3} \theta^2 + \\ & + l_p (11,65974412 - 0,749301405 \theta + 0,01551899 \theta^2) + \\ & + l_p^2 (-56,31783769 + 3,792132874 \theta - 0,078891146 \theta^2), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} m_2 = & 0,210866252 + 11,65976569 l_p - 56,3179325 l_p^2 + \\ & + \theta (0,018431352 + 0,7493304248 l_p - 3,792145187 l_p^2) + \\ & + \theta^2 (0,438189 \cdot 10^{-3} + 0,015519068 l_p - 0,078891476 l_p^2), \end{aligned} \quad (13)$$

$$F_2(l_p, \theta) = l_p^{a+b\theta+c\theta^2}, \quad (14)$$

где

$$a = 0,147605215 + 7,67386029 l_p - 26,7065922 l_p^2, \quad (15)$$

$$b = -0,012019835 - 0,31033230 l_p + 0,99393610 l_p^2, \quad (16)$$

$$c = 10^{-3} (0,269051 + 3,577562 l_p - 7,730533 l_p^2). \quad (17)$$

$$F_3(l_p, \theta) = \theta^{\alpha+\beta l_p+\gamma l_p^2}, \quad (18)$$

где

$$\alpha = 10^{-3} (-0,853186 + 5,985027 \theta - 0,26905 \theta^2), \quad (19)$$

$$\beta = 7,67385869 - 0,310332307 \theta + 0,003577572 \theta^2, \quad (20)$$

$$\gamma = -26,70658468 + 0,993936279 \theta - 0,007730578 \theta^2. \quad (21)$$

Расчет степени черноты водяных паров для $l_p = 0,04$ и $\theta = 12,73$ ($t = 1000$ °С) по полученным формулам (8)–(21) приводит к отклонению от данных Х. Хоттеля $\Delta = -0,23$ % с учетом поправочного коэффициента на парциальное давление водяного пара $\beta = 1,15$ при $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,191$ и $E_{\text{H}_2\text{O}} = 2,8 \cdot 10^4$ Вт/м².

Можно полагать, что разработанный метод двухпараметрической адаптации позволяет достоверно описать единой зависимостью степень черноты водяного пара в функции l_p и θ .

3. Адаптация экспериментальных данных Д. Эдвардса. Д. Эдвардс [5, 6] произвел экспериментальное определение степени черноты ряда газов, в том числе CO_2 и H_2O , что важно для продуктов сгорания органических топлив, применяемых в теплоэнергетике и промышленной теплотехнике; экспериментальная установка позволяла определять интегральную степень черноты. Экспериментальная установка включала все необходимые приборы и оборудование, обеспечивающие требуемую точность измерения спектральной плотности радиационного потока. Результаты экспериментов представлены в виде графиков на поле логарифмических координат по абсциссе и ординате, что несколько затрудняет сравнительный анализ [7,8].

Результаты обработки данных Д. Эдвардса по степени черноты CO_2 с применением двухпараметрической схемы можно представить в виде разности двух функционалов

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = F_1(l_p) - F_2(l_p) \cdot 10^{-3} T, \quad (22)$$

где

$$F_1(l_p) = 0,10604136 + 2,775092225 l_p - 8,858008562 l_p^2, \quad (23)$$

$$F_2(l_p) = 0,033272654 + 0,132336726 l_p + 2,298471747 l_p^2. \quad (24)$$

Аналогичные зависимости получены для степени черноты паров H_2O

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = F_3(l_p) - F_4(l_p) \cdot 10^{-3} T, \quad (25)$$

где

$$F_3(l_p) = 0,083848783 + 9,220363569 l_p - 45,64014769 l_p^2, \quad (26)$$

$$F_4(l_p) = 0,037199683 + 0,715094839 l_p - 3,753951627 l_p^2. \quad (27)$$

Данные по степени черноты CO_2 хорошо согласуются с данными Х. Хоттеля, отклонение не превышает + 4,0 %, увеличиваясь к малым значениям l_p и к низким температурам $T \approx 1000$ К. Данные по степени черноты H_2O отличаются от данных Х. Хоттеля на величину, достигающую + 40 %, увеличиваясь в области малых значений $l_p \approx 0,004$ МПа·м и высоких температур $T \approx 2000$ К, что в значительной степени объясняется погрешностью при экстраполяции опытных данных, а также отклонением излучения H_2O от закона Бера.

С учетом этих данных расчет плотности потока собственного излучения CO_2 и H_2O можно производить по единой зависимости

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (28)$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/м²К⁴ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; при определении степени черноты смеси паров CO_2 и H_2O применяется зависимость

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (29)$$

Определенные по зависимостям (22)–(27) данные для степени черноты углекислоты CO_2 и водяного пара H_2O , согласно экспериментам Д.Эдвардса, изображены на рисунках 1, 2. Характер изменения степени черноты на графиках рисунков 1 и 2 подтверждает тезис о том, что описание этих зависимостей простой степенной формулой не вполне достоверно [9–14].

Результаты адаптации, достоверность которых и возможные погрешности определены, могут быть отражены в основных выводах.

Выводы. В результате проведенной аналитической работы с экспериментальными данными по степени черноты промышленных газов получены зависимости, которые позволяют использовать их в автоматизированных расчетах. В двухпараметрической схеме анализа за основу приняты экспериментальные данные Х. Хоттеля и Д. Эдвардса, произведен сравнительный анализ результатов расчетов по формулам, в основу которых положены данные этих экспериментов.

При высоких значениях оптической плотности газов $l_p > 0,01$ МПа·м степень черноты углекислоты выше таковой для водяных паров, при низких значениях $l_p < 0,01$ МПа·м преобладает излучение водяного пара. Определены погрешности метода и объяснены пределы допустимой экстраполяции в поле двух основных факторов – оптической плотности потока излучения и температуры газа.

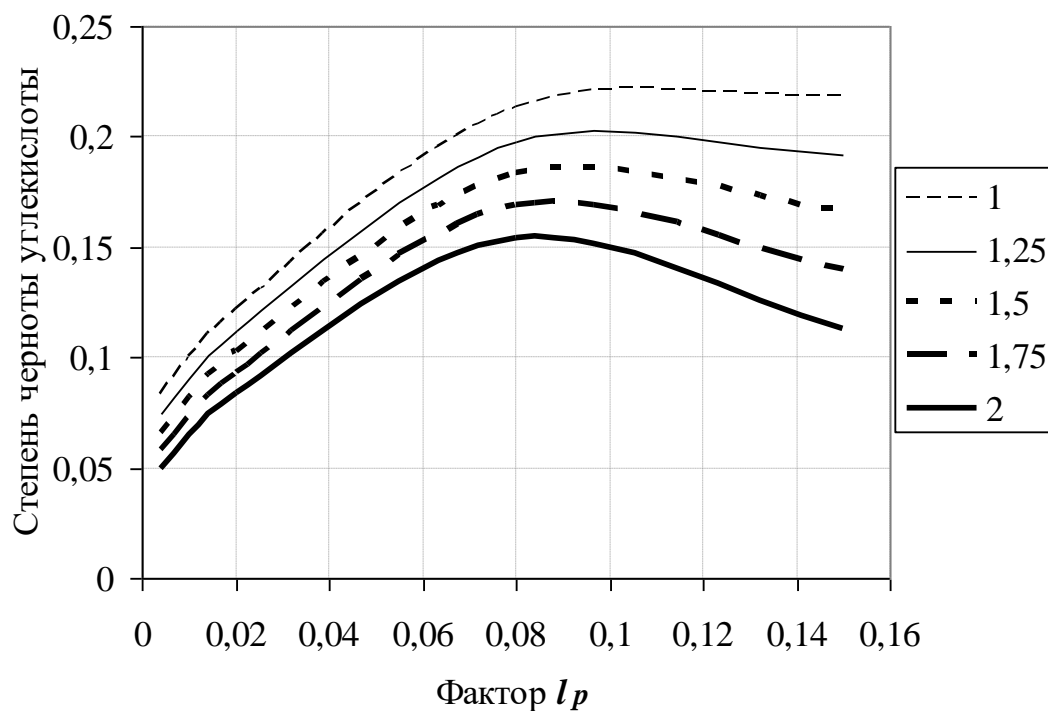


Рис. 1. Степень черноты CO_2 в функции фактора оптической плотности среды l_p при изменении температуры $10^{-3}T$ (при параметре 1,5 температура $T = 1500$ К и т.д.)

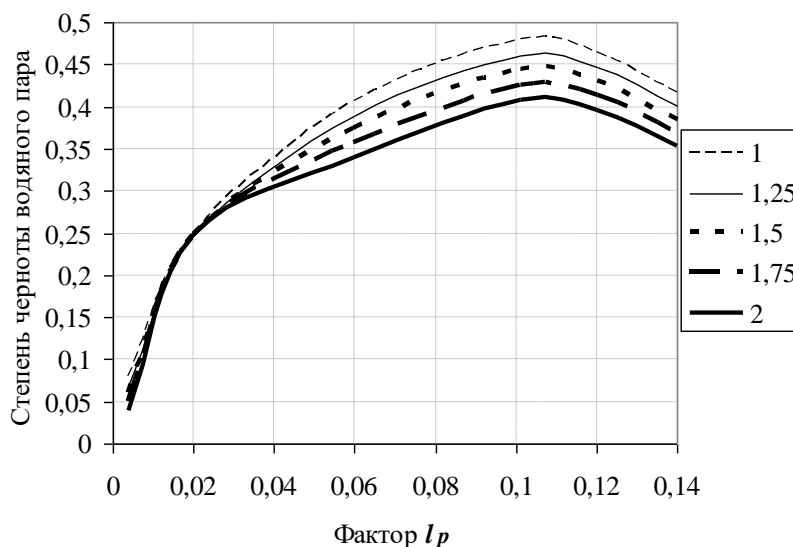


Рис. 2. Степень черноты H_2O в функции фактора оптической плотности среды l_p при изменении температуры $10^{-3}T$ (при параметре 1,75 температура 1750 К и т.д.)

Список использованных источников

1. Телегин А.С. Тепломассоперенос: 2-е изд. / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
2. Швыдкий В.С. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон. – М.: «Интермет Инжиниринг», 1999. – 520 с.
3. Зобнин Б.Ф. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев, В.Г. Лисиенко, А.С. Телегин, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
4. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1984. – 240 с.
5. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т.1 / Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
6. Edwards D.K. Thermal Radiation Measurements, chap.9 in Measurements in Heat Transfer, ed. E.R.G. Eckert and R.J. Goldstein, chap.9, Hemisphere, Washington, D. C., 1976.
7. Gordon Y.M. Scale-up problems of new alternative pyrometallurgical technologies / Y.M. Gordon, E.V. Toropov // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых 22-26 апреля 2013г. / Под ред. Е.В. Торопова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. С. 5-12.
8. Toropov E.V. The Systemically Structured Adaptation of Heat Transfer in Boilers // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. Т. 16. № 1. С. 19-23.
9. Спэрроу Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс. – Энергия. Ленингр. отделение, 1971. – 294 с.
10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
11. Тепло- и массообмен: учеб. пособие. В 2 ч. Ч.1 / Б.М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А.П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2007. – 606 с.
12. Основы практической теории горения: учебное пособие / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. Под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 312 с.
13. Швыдкий В.С. Математические методы теплофизики / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев, В.С. Шаврин. – М.: Машиностроение, 2001. – 232 с.
14. Блох А.Г. Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, А.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 239 с.